油圧-電動ハイブリッド駆動型双腕ロボット

高橋 宏昌^{*1} 一田 伸治^{*1} 原 直行^{*1} 寺井 藤雄^{*1}
風間 拓朗^{*2} 菅野 健一郎^{*3} 大賀 淳一郎^{*4}

Hydraulic-and-electric Double-arm Robot

Hiromasa Takahashi^{*1}, Shinji Ichida^{*1}, Naoyuki Hara^{*1}, Fujio Terai^{*1},
Takuro Kazama^{*2}, Kenichiro Kanno^{*3} and Junichiro Ooga^{*4}

The cell production method, which facilitates high-product-mix and low-volume manufacturing, has been expanding into the mainstream, and demand has been growing for a robot similar in size to workers that can dexterously act as a multiskilled worker and handle heavy materials in a cell production line.

We have developed a hydraulic double-arm robot that is equipped with hydraulic actuators for the arms, allowing it to handle heavy materials, and the TV800 vertical articulated robot arm consisting of electric actuators produced by Toshiba Machine Co., Ltd. For the wrists, allowing it to also achieve dexterous handling operations through visual feedback and compliance control.

Also, we have developed a new fault detection system equipped with this robot. This system can detect faults of materials, not only by visual inspection, but also by weight inspection using the pressure of hydraulic cylinder.

Key Words: Robot, Hydraulic-and-electric, Double Arm, Cell Production

1. はじめに

1.1 セル生産方式の自動化ニーズ

単一製品を大量に製造するライン生産方式では、ベルトコンベアによって流れてくる製品に、部品を取り付けていく。その作業は限定された単純な動作で成り立っていたため、それを正確にすばやく行うことができるシングルアーム産業用ロボットが、1980年代以降、自動車産業を中心に導入されてきた。その一方で、電気・電子産業では、多様化する消費者ニーズに対応するため多品種少量生産が求められ、ライン生産方式に代わってセル生産方式が主流となった。

セル生産方式は、作業者が一人で製品の組み立てを完成させるため、高い習熟度を要し、作業自体が重労働であることから、人員の確保が難しくなると予想されている。さらに、新興国への工場進出が進んだものの、人件費高騰により、安価で大量な

労働力によるローコストオペレーションモデルが困難になりつつある。以上から、セル生産に対応したロボットが求められてきた。

これに対し、ロボットメーカーなどから1) シングルアーム産業用ロボットを複数台活用したセル生産システム（ロボットセル）、2) アーム2本をボディに取り付けた双腕型産業用ロボットが提案されている[1]。

1.2 セル生産方式の自動化への問題点

作業によるセル生産方式への適用条件は、市場・製品設計・製造工程の三つの観点から、Table 1のようにまとめられる[2]。これらの条件を満足していると、セル生産方式の導入効果が得られやすくなる。今までに提案されているロボットセルや双腕型産業用ロボットは、これら条件を満足した製造ラインに導入されている場合が多い。

その一方、対象製品が市場条件を満たしていても、製品設計や製造工程条件を満足できなければ、セル生産方式の導入効果が小さくなる。つまり、対象製品が多品種少量生産であっても、セル生産方式が有効であるとは言えない。具体的には洗濯機・冷蔵庫などの白物家電製品や中小型モータ・ポンプなどのインフラ製品などが挙げられる。これら製品は、市場条件は合致しているものの、構成部品が重いため、製品設計条件を満足することができない。これらの製品の製造ラインをセル化し、さらにはロボットによる自動化が望まれているが、そのためには1) 重量物が搬送できること、2) 人に近い器用な動作ができるこ

原稿受付 2014 年 12 月 8 日

^{*1}株式会社東芝 生産技術センター

^{*2}東芝機械株式会社

^{*3}東芝 IT コントロールシステム株式会社

^{*4}株式会社東芝 研究開発センター

^{*1}TOSHIBA Co., Ltd. Corporate Manufacturing Engineering Center

^{*2}TOSHIBA MACHINE Co., Ltd.

^{*3}Toshiba IT & Control Systems Corporation

^{*4}TOSHIBA Co., Ltd. Corporate Research & Development Center

■ 本論文は提案性（システム設計・構築分野）で評価されました。

Table 1 The conditions for successful implementation of assembly cells

	The conditions for successful implementation of assembly cells
Market conditions	① Frequent model changes are necessary ② There are drastic fluctuations in demand ③ The company has been obliged to adopt small-lot multi-kind production
Product design Conditions	① Low total assembly man-hours where production volume is high ② Small number of assembly components ③ Small products and components
Manufacturing process Conditions	① few difficult operations requiring a high level of proficiency ② High possibility of securing multi-skilled workers because of the low production volume ③ few difficult operations performing different functions ④ few operations requiring a new manufacturing technology ⑤ The difficulty difference of operations is small ⑥ Small equipment ⑦ No need for expensive equipment or high possibility of sharing equipment

と、3) 設備レイアウトを大幅に変更しないように人と同等サイズであることが必要である。従来のロボットセルや双腕型産業用ロボットは、電動アクチュエータが使用されているため、小型のものは出力が小さく、重量物を搬送することが難しい。また、パラレルリンク機構を用いた場合、高出力が得られるものの、可動範囲がシリアルリンク機構のロボットと比べて非常に小さい。

そこで筆者らは、大きな負荷の掛かる上腕部には油圧アクチュエータを、細かな作業を担う前腕部には電動アクチュエータを組み合わせたシリアルリンク機構でアームを構成し、コンパクトで重量物を搬送できるロボットを開発した[3][4]。そしてさらに、油圧アクチュエータ内圧をセンシングすることで重量検知機能をこのロボットに追加した。ここでは、その概要と特長について述べる。

2. 油圧-電動ハイブリッド駆動型双腕ロボット

2.1 目的

前述のような要求に応えるため、以下のコンセプトに基づき開発を行った。

(1) 高可搬質量

一般に製造ラインでは作業員による可搬制限を 20 [kg] と設定していることが多い。これは、文献[5]の I 重量物取扱い作業 2 人力による重量物の取扱い (2) にて、「満 18 歳以上の男子労働者が人力のみにより取り扱う物の重量は、体重のおおむね 40% 以下となるように努めること。満 18 歳以上の女子労働者では、さらに男性が取り扱うことのできる重量の 60% 位までとすること。」と記載されていることによる。

また、同資料の別紙 I 重量物取扱い作業 2 人力による重量物の取扱いにおいて、「なお、一般に女性の持上げ能力は、男性の 60% 位である。また、女性労働基準規則では、満 18 歳以上の女性で、断続作業 30 kg、継続作業 20 kg 以上の重量物を取扱うことが禁止されている。」と記載されている。

以上より、本ロボットはアクチュエータ出力を高め、可搬質量を 20 [kg] 以上とすることを目標とする。

(2) 器用な動作

人に近い器用な動作ができるよう双腕型とし、カメラ画像によるワーク等の動作環境認識能力を高める。

Fig. 1 Comparison of output torque of hydraulic and electric actuators (参考文献 [6] の記載データに基づき作成) **Fig. 2** Outline of hydraulic-and-electric double-arm robot

(3) コンパクト性

生産現場に適用しやすいよう、人と同等サイズである肩幅 700 [mm] 程度とする。

2.2 ハードウェア構成

電動アクチュエータの出力トルクは、電機子の電流と磁束に比例する。高出力を得るためには、コイルや磁石などの構成部品を大きくしたり、ギヤを追加するなど部品点数を増やす必要があるため、アクチュエータが大型化してしまう。

その一方、油圧アクチュエータの出力は、圧力と流量に比例する。パスカルの原理を応用しているため、圧力を上げるか、ピストンの面積比を高めることで高出力が得られる。Fig. 1 に、アクチュエータ質量とトルクの関係を示す。

Fig. 1 が示すように、油圧アクチュエータは電動と比べて、同一質量でも 5~10 倍程度の出力を得ることができる。

そこで、今回は上腕部には油圧アクチュエータを、前腕部には電動アクチュエータを組み合わせたシリアルリンク機構のアーム構成とした。Fig. 2 に開発したロボットの外観図を示す。人と同程度の可動域を目指し、油圧アクチュエータはシリンダタイプを採用し、前腕部の電動アクチュエータはシングルアーム産業用ロボット (東芝機械 (株) 製 TV800 [7]) の 3 軸を使用した。TV800 は手先部の交換が可能な機構となっており、セル生産で必要とされるねじ締め、塗布、検査などの複数の作業に対応可能である。

Fig. 3 Configuration of hydraulic-and-electric double-arm robot

その結果、あらゆる姿勢に対応可能な可搬質量は5[kg]であるが、手首を重力方向に向けて用いるなど、特定姿勢での可搬質量は片腕で50[kg]を実現することができた。

2.3 ソフトウェア構成

制御コントローラでは、事前に作成した組立指示情報に従い、リアルタイムに各軸の関節角度を生成し、各駆動部に動作指令を出す。ロボットのシステム構成図を Fig. 3 に示す。

油圧アクチュエータは、油圧バルブの開度を連続的に変化させることで制御する。油圧バルブはコントローラからD/Aを介してコントローラアンプによって電圧を変化させて制御している。このバルブの開度を制御するために、ロボットの関節軸に取り付けたロータリーエンコーダの角度速度の値から計算した速度を流量の近似値として使用し、この流量相当値をフィードバックしている。油圧アクチュエータは小型で高出力といった長所がある一方で、電動アクチュエータと比べて一般に位置決め精度や応答性が劣る。上記のように、油圧流量を制御する油圧バルブに、流量変化に基づくフィードバック制御を適用することで、制御性能を高めている。詳細な制御方法や実験結果は3.2節にて述べる。

また、ロボットの手首部に手先位置補正用の二次元カメラを搭載している。このカメラを用いた視覚フィードバック制御(Look&move動作)により、対象物の置かれた位置に応じて、アームの手先位置決め補正を行うことができる。現在、ロボットの手先のコンプライアンス制御機能の開発も進めており、それが完成すると、生産現場で必要とされるピン挿入作業もできるようになる。さらに、ヘッド部にはワークやジグなどの動作環境を認識するためにステレオカメラを搭載しており、ワーク周辺の三次元(3D)情報を検出することが可能である。

以上より、本ロボットの仕様を Table 2 にまとめる。

油圧アクチュエータと電動アクチュエータのシリアルリンク機構の構成により、人と同等サイズの肩幅700[mm]で、片腕での可搬質量50[kg]を実現した。これは Fig. 4 に示すとおり、一般的な双腕型産業用ロボットと比べても、コンパクトで可搬質量が大きく、現在のセル生産現場により対応しやすいといえる。

Table 2 Specification of hydraulic-and-electric double-arm robot

	Specification
Size	Shoulder : 700mm Upper arm : 460mm Lower arm : 580mm
Load	Max 50kg (100kg by double arm)
D.O.F	14
Actuators	7axis : Hydraulic, 7axis : electric
Controller	Compliance control Visual control flow feedback control
Sensors	Head : Stereo camera (Detection of parts) Endeffector : Webcam (Detect of position)

Fig. 4 Benchmark comparison of various double-arm robots

3. 技術課題とその取り組み

3.1 ロボット動作シミュレータ

ロボットを制御するためには、手先の位置や姿勢から各関節角度を求める逆運動学を解く必要がある。一般に、自由度が増すと逆運動学が複雑化するため、実機でのデバッグ時間が長期間になる。そこで、今回はソフトウェアをモジュール化し、複数人による並行作業でコーディングを行った。これらのモジュールの妥当性を短期間に確認するために、Fig. 5 のような動作シミュレータを構築した。

このシミュレータは、3DCADで作成したロボットおよび作業環境のモデルを取り込み、ロボットアームの動作領域や作業性の確認を行うことができる。また、単腕、双腕、腰、および双腕協調などの運動学計算を適宜切り替えることができ、各関節の現在角度とロボットカメラ画像のリアルタイム表示や、特異姿勢の判別を行うことができる。ソフトウェアのデバッグ作業に当たっては、このシミュレータを活用した。ハードにより近い下位のソフトウェアでは、アクチュエータ回りのエラー処理の対応に、上位のソフトウェアではアームの生成起動の検証に用いることで大きなパワーの出る油圧駆動に対し、安全にデバッグ作業を行うことができた。

3.2 油圧流量制御

2.3節で述べたとおり、このロボットはリアルタイムで生成した指令角度・速度に従って、各軸の駆動部が動くように制御し

Fig. 5 Outline of simulation

Fig. 6 Block diagram of cascade controller with added velocity control loop

Fig. 7 Block diagram of improved controller with added acceleration feed forward

ている。油圧アクチュエータは油圧バルブによって油圧流量を制御することで、指令角度・速度に追従させている。ここでは、その制御方法として、二つの方式を検討した。一つは、Fig. 6 に示す速度制御ループをマイナーループに追加したカスケード制御方式 [8] である。これに、油圧バルブ固有の特性である不感帯・ヒステリシスに対応するため、Fig. 6 のように油圧バルブ入力前に適切なオフセット調節部を設けることで、微小な流量変化に対しても、速度応答性を高めることができたようにした。

しかし、この方法では動作開始時と停止時に遅れが発生し、振動が大きくなる結果となった。そこで、Fig. 7 のように加速度フィードフォワードとローパスフィルタを組み入れることで、上記の遅れを改善し速度応答性を高めた。

以上の二つの制御構成にて、速度応答性を比較するため、位置精度に最も影響を与え、かつ慣性が最も大きい腰部軸を用いて評価した。評価時の外観を Fig. 8 に示し、その結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 8 Experiment external view

(a) Lift up motion

(b) Lift down motion

Fig. 9 Comparison of velocity response of controller with Fig. 6 and Fig. 7

Fig. 9 の縦軸は速度を示しているが、+ 方向が持ち上げ方向を、- 方向が持ち下げ方向を示している。

この結果から、反重力方向である起こし動作開始時に 0.15 [s] 程度の遅れが大幅改善でき、停止時の遅れが 1.1 [s] から 0.4 [s] まで低減できることを確認した。これらは加速度フィードフォワードによる効果である。また、動作中の速度は速度フィードフォワードにより、追従性能を向上できた。これらは、重力方向である倒れ動作時も同様な効果が得られている。

加えて、倒れ動作時は重力による影響で、応答波形が振動しやすい。そのため、位置・速度フィードバックと指令電圧部にローパスフィルタを入れることで、振動を抑制している。油圧

Fig. 10 Joint angle using a hydraulic actuator response

Table 3 Result of the end-effector position estimation

Joint angle[°]						End effector position[mm]	
R1	R2	R3	R4	R5	R6	X	Y
-14.00	22.00	68.00	-114.00	-103.00	-121.00	1088.74	-197.77
-14.07	21.93	67.93	-114.07	-103.07	-121.07	1088.72	-198.61
The difference						0.02	0.84

制御バルブそのものの応答性が低いため、相対的にフィルタによる遅延の影響は小さい。

3.3 手先の位置決め精度

本節では、油圧アクチュエータと電動アクチュエータを組み合わせたハイブリッド構成のメリットについて、手先の位置決め精度の観点から述べる。

まず、油圧アクチュエータを用いた関節軸の位置決め精度を明確にするため、Fig. 7 の制御系を用いた際の関節角応答結果を Fig. 10 に示す。評価対象は Fig. 2 に示す R2 (右腕 2 軸目) 軸とした。Fig. 10 が示すように R2 軸の関節軸の位置決め誤差は 0.07° である。

そこで、油圧アクチュエータの各関節軸の位置決め精度が R2 軸の位置決め精度とほぼ同等と仮定すると、全軸を油圧アクチュエータで構成した場合の手先精度は Table 3 に示す結果と推定される。ここで、推定方法には 3.1 節で示したロボットシミュレータを用いて算出した。

Table 3 が示すように、全関節軸が 0.07° ずれることで、手先の位置決め誤差は最大 0.84 [mm] と推定できる。

次にこのロボットの手先位置決め精度について述べる。右腕の油圧・電動両軸を用いて、XY 方向に同時に 50 [mm] 手先を移動させた場合、各方向の位置決め誤差をプロットしたものを Fig. 11 に示す。この際のロボットの姿勢は、ねじ締め作業を行う際の代表的な姿勢であり、Table 3 と同一である。

Fig. 11 が示すようにこのロボットの手先精度は 0.3 [mm] 程度であることから、全軸油圧アクチュエータで構成した場合と比べて手先の位置精度は向上している。

3.4 油圧シリンダ内圧を用いた重量検知機能

通常のワーク有無検知は、頭部に搭載されたステレオカメラを使い、ワーク外観を確認することで、ワーク有無を検知する。しかし、外観確認だけでは、内部部品の取り付け忘れなどを検知することができない。そこで、外観上はまったく同じワーク

Fig. 11 Position error in work space

Fig. 12 Pressure response example when lifting parts (weight: 32 [kg])

でも不良検出することができるよう、ワーク重量を検知するシステムを搭載した。

このロボットの腰部は、リンクと油圧シリンダで構成されており、人間の腰のように曲げることができる。搭載したワーク重量検知システムは、この腰部シリンダの 2 箇所の内圧 (A/B ポート) を圧力計により以下の手順で測定する。

- 1) 双腕ロボットが、腕を動かしてワークをつかむ。
- 2) 腰軸を一定角度まで回転させ、ワークを持ち上げる。
- 3) 持ち上げ後 1 [s] 間停止し、その間の A/B ポートの圧力を測定する。32 [kg] ワークの持ち上げ動作による圧力変動の様子を Fig. 12 に示す。
- 4) A/B ポートの差圧を平均化し、重量検知する。Fig. 12 における約 3~4 [s] の間の部分がこれに該当する。この平均化した差圧を「圧力値」と呼ぶ。

次に、この圧力値と質量の関係について述べる。質量の異なる 4 種類のワークをそれぞれ 5 回繰返し持ち上げ、その際の圧力値を測定した。Table 4 にその実験結果を示す。

Fig. 13 は Table 4 の結果をグラフ化したものである。以上から、圧力と総質量の相関係数 $R^2 = 0.93$ と大きく、相関性が高いことが分かる。

Table 4 Relationship between pressure and weight

	Weight[kg]	12.36	13.36	15.24	17.12
Pressure [MPa]	No.1	3.089	3.172	3.271	3.549
	No.2	3.176	3.136	3.283	3.497
	No.3	3.144	3.141	3.271	3.456
	No.4	3.142	3.139	3.245	3.478
	No.5	3.117	3.133	3.260	3.466
	Average	3.134	3.144	3.266	3.489
	3σ	0.097	0.047	0.044	0.110

Fig. 13 Relationship between pressure and weight**Table 5** Result of significance test

Weight difference	Test result	
	P – value	Significant difference (5%)
1.00	0.535	No
1.88	0.000	Yes

また、これらのデータを用いて、t サンプル検定を行った結果を、**Table 5** に示す。この表から、差分質量が 1.8 [kg] であれば有意差があることから、同一姿勢において信頼度 95% で約 2 [kg] の質量差を検知することができる。一般的にロボットに適用できるコンパクトな力覚センサやトルクセンサは、高価、検出範囲が小さい、衝撃に弱いといったことから、今回開発したロボットのような可搬質量が大きいロボットには不向きである。また、サイズに関しても油圧センサはトルクセンサと比べて小

さく、柔軟に配置可能という点では機構設計上の大きな利点となる。

4. ま と め

今回開発したロボットは、大きな負荷の掛かる上腕部には油圧アクチュエータを、細かな作業を担う前腕部には電動アクチュエータを適切に組み合わせることで、高可搬質量で器用でありながら、コンパクトなロボットを実現した。加えて検査機能を追加することでさらなる自律化を図った。このロボットを生産工程に展開することで、従来ハンドクレーン等を用いて人手によって行われていた重量物（例えば洗濯機や大型コイルなど）の組立・搬送工程を、自動化することが可能になる。さらに生産現場の共通課題である、3 [K]（きつい、汚い、危険）作業を排除することができ、作業者の安全確保といった観点からもこのロボットは貢献できると考えられる。

ロボット産業市場は 1.6 兆円（2015 年）から、9.7 兆円（2035 年）に増大すると予測されている [9]。中でも高出力が要求されるサービス分野の介護・福祉（自立支援）および重作業支援分野においては、4,505 億円（2035 年）の市場に急成長すると見込まれている。今後はさらなる高出力・軽量化を図り、生産現場だけでなく急成長するサービス分野への参入を目指して取り組んでいく。

参 考 文 献

- [1] 一般社団法人日本機械工業連合会：“平成 25 年度ロボット産業・技術の振興に関する調査研究報告書”，pp.16–55, 2014.
- [2] 坂爪裕：セル生産方式の編成原理。慶應義塾大学出版会，2012.
- [3] 高橋，ほか：“油圧駆動双腕ロボット”，東芝レビュー，vol.69, no.5, pp.37–40, 2014.
- [4] 高橋，ほか：“油圧駆動双腕ロボット”，日本ロボット学会第 32 回学術講演会予稿集 DVD-ROM，3N1-02, p.199, 2014.
- [5] 厚生労働省：職場における腰痛予防対策指針及び解説 参考 2 の別添，http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000034et4-att/2r98520000034pjn_1.pdf
- [6] 田中，ほか：“油圧・空気圧と電気モータの特性比較に関する調査研究”，平成 25 年春季フルードパワーシステム講演会論文集，pp.17–25, 2013.
- [7] 加藤，ほか：“セル生産に適したロボットと制御技術”，東芝レビュー，vol.64, no.1, pp.52–55, 2009.
- [8] 松日楽，ほか：ロボットシステム入門。改訂 2 版。オーム社，1999.
- [9] 経済産業省：ロボットの将来市場予測，<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3487098/www.meti.go.jp/press/20100423003/20100423003-2.pdf>

高橋宏昌 (Hiromasa Takahashi)

2004 年慶應義塾大学理工学研究科総合システムデザイン専攻修士課程修了。同年 (株) 東芝入社。現在生産技術センターメカトロソリューション推進部研究主務。メカトロ要素技術および製造設備の開発に従事。日本機械学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

一田伸治 (Shinji Ichida)

2009 年愛媛大学工学部機械工学科卒業。同年 (株) 東芝入社。現在生産技術センターメカトロソリューション推進部研究員。メカトロ要素技術および製造設備の開発に従事。

原 直行 (Naoyuki Hara)

2013 年東京都市大学工学研究科機械システム工学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在生産技術センターメカトロソリューション推進部研究員。メカトロ装置の機構や制御技術に興味を持ち、ロボットの高出力化や操作性向上化技術に関する研究を行っている。工学博士(2013 年)。日本機械学会会員、IEEE 会員。
(日本ロボット学会正会員)

寺井藤雄 (Fujio Terai)

1985 年東京電機大学理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在生産技術センターメカトロソリューション推進部研究主幹。メカトロ装置の機構や制御技術に興味を持ち、ロボットの高出力化や操作性向上化技術に関する研究を行っている。工学博士(2006 年)。精密工学会会員、応用物理学会会員、日本技術士会会員。
(日本ロボット学会正会員)

風間拓朗 (Takuro Kazama)

1994 年芝浦工業大学通信工学科。同年(株)芝浦製作所(現:芝浦メカトロニクス)入社。2005 年東芝機械(株)に転籍し、現在同社制御システム事業部主任。ロボットを応用した装置システムの電気設計・ソフト開発に従事。

菅野健一郎 (Kenichiro Kanno)

1989 年法政大学工学部機械工学科卒業。同年東芝 FA システムエンジニアリング(株)(現:東芝 IT コントロールシステム)入社。現在に至る。メカトロ要素技術および製造設備の開発に従事。

大賀淳一郎 (Junichiro Ooga)

2004 年大阪大学大学院工学研究科知能機能創成工学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在(株)東芝 研究開発センター機械・システムラボラトリー研究主務。アームの運動制御、ロボットのソフトウェアシステムに関する研究開発に従事。日本機械学会会員。
(日本ロボット学会正会員)